

ДВА ТИПА ГЕНЕРАЦИИ СТИМУЛИРОВАННОГО СУБМИЛЛИМЕТРОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ГОРЯЧИХ ДЫРОК В СЛАБО ЛЕГИРОВАННЫХ КРИСТАЛЛАХ ГЕРМАНИЯ

И.М. Мельничук, Ю.А. Митягин, В.Н. Мурзин, С.А. Стоклицкий,
И.Е. Трофимов, Ю.А. Ефимов

Впервые в одном и том же кристалле p-Ge зарегистрированы два типа генерации стимулированного излучения горячих дырок на межподзонных переходах и переходах циклотронного типа. Обсуждаются особенности явления и модель генерации, учитывающая антипересечение уровней Ландау и перемешивание волновых функций легких и тяжелых дырок в состоянии с одинаковой полной энергией в скрещенных $\vec{E} \perp \vec{H}$ полях.

В настоящей работе при исследовании излучения горячих носителей заряда в полях $\vec{E} \perp \vec{H}$ в p-Ge с различным содержанием примесей обнаружены два типа лазерной генерации субмиллиметрового излучения в одних и тех же слабо легированных ($N_a = 7 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$) кристаллах. Исследован спектральный состав излучения и проведено сопоставление спектров. Приводится интерпретация полученных данных, основанная на представлениях о межподзонных дырочных переходах.

Исследовались образцы p-Ge ($N_a = 6 \cdot 10^{12} - 3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$), которые вырезались в форме прямоугольных параллелепипедов и помещались внутри сверхпроводящего соленоида в жидком гелии (4,2 К). Электрическое поле $\vec{E} \perp \vec{H}$ прикладывалось в виде импульсов $(0,5 \div 1) \cdot 10^{-6} \text{ с}$ с частотой 1–10 Гц. Спектры излучения регистрировались на длинноволновом ИК фурье-спектрометре /1/ с использованием охлаждаемых быстродействующих фотоприемников Ge(Ga) и p-GaAs. Концентрация примеси и размеры кристаллов: $3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ($2 \times 5 \times 60 \text{ мм}^3$); $1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ($3 \times 6 \times 30 \text{ мм}^3$), $7 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ($2 \times 5 \times 50 \text{ мм}^3$), $6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ ($3 \times 8 \times 10 \text{ мм}^3$). Магнитное поле было направлено вдоль длинной стороны образца.

В верхней части рис. 1 приведены значения напряженностей полей E и H, при которых наблюдалась лазерная генерация. Области 2 и 2' относятся к образцам с концентрацией примесей $7 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. В интервале полей, соответствующих области 2, наблюдается генерация излучения в диапазоне частот 50–60 и 70–150 см^{-1} , которая исследовалась в ряде работ /1–4/ и объясняется межподзонными переходами дырок из легкой в тяжелую подзону. Спектр излучения этого типа имеет вид широких полос с тонкой модовой структурой (рис. 2а) /2–4/. Наличие полос обусловлено квантованием Ландау энергетического спектра легких дырок, что и определяет сложный характер зависимостей частоты излучения от магнитного поля /2–4/. Генерация наблюдается в полях 4–17 кЭ. В образцах с более высоким содержанием примесей область генерации смещается в сторону больших значений полей E и H (рис. 1), что сопровождается повышением частоты излучения и, очевидно, объясняется изменением интенсивности рассеяния горячих носителей на ионизированных примесях, особенно заметным в низкоэнергетической части спектра.

Наряду с описанным излучением в тех же слабо легированных кристаллах p-Ge ($N_a = 7 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$) в интервале более высоких магнитных полей обнаружено лазерное излучение иного типа, которое несколько слабее по интенсивности и существенно отличается по своим спектральным характеристикам. Оно возникает в полях 35 – 45 кЭ (область 2' на рис. 1) и представлено в спектре узкой линией, частота которой изменяется пропорционально H в спектральном диапазоне 70 – 90 см^{-1} . Пример спектров излучения этого типа приведен на рис. 2б. Зависимость $\nu(H)$ является монотонной и примерно соответствует зависимости, характерной для частоты циклотронного резонанса легких дырок. В отличие от ν , интенсивность излучения сильно осциллирует с ростом напряженности магнитного поля. При переходе к образцам более чистого германия ($N_a = 6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$) лазерная генерация на межподзонных переходах исчезает и в полях 15 – 25 кЭ (область 3 на рис. 1) наблюдается генерация стимулированного излучения циклотронного типа в диапазоне 30 – 50 см^{-1} /5 – 7/. Спектр излучения в этом случае имеет вид узкой линии (рис. 2б) /7/, частота которой меняется пропорционально H (рис. 1) примерно по тому же закону, что и в случае лазерной генерации циклотронного типа в слабо легированных ($7 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$) кристаллах.

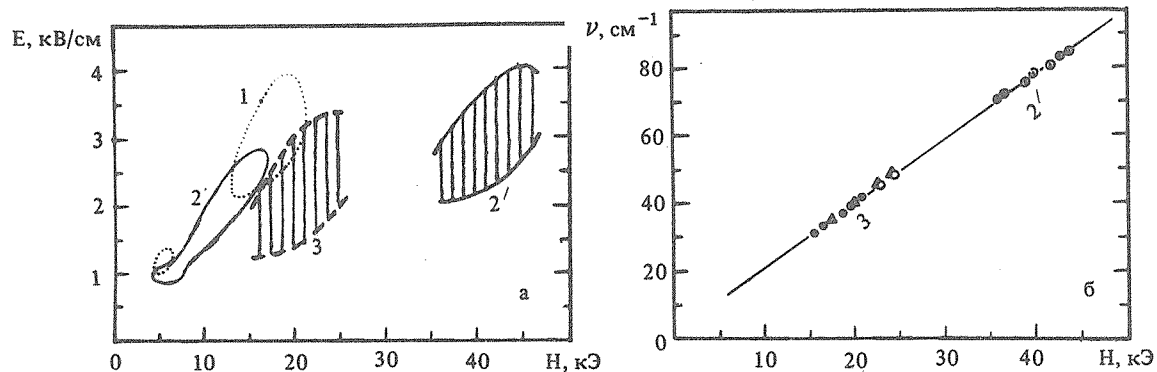


Рис. 1. а) Области генерации стимулированного излучения р-Ge на межподзонных дырочных переходах (области 1 и 2) и на переходах циклотронного типа (области 2' и 3). б) Зависимость частоты ν излучения циклотронного типа от поля H ($N_A = 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ (1), $2' 7 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ (2 и 2'), $6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ (3)). Экспериментальные точки: \bullet – 1,6 кВ/см, Δ – 1,9 кВ/см, \circ – 2,4 кВ/см, \ominus – 3,0 ÷ 3,2 кВ/см.

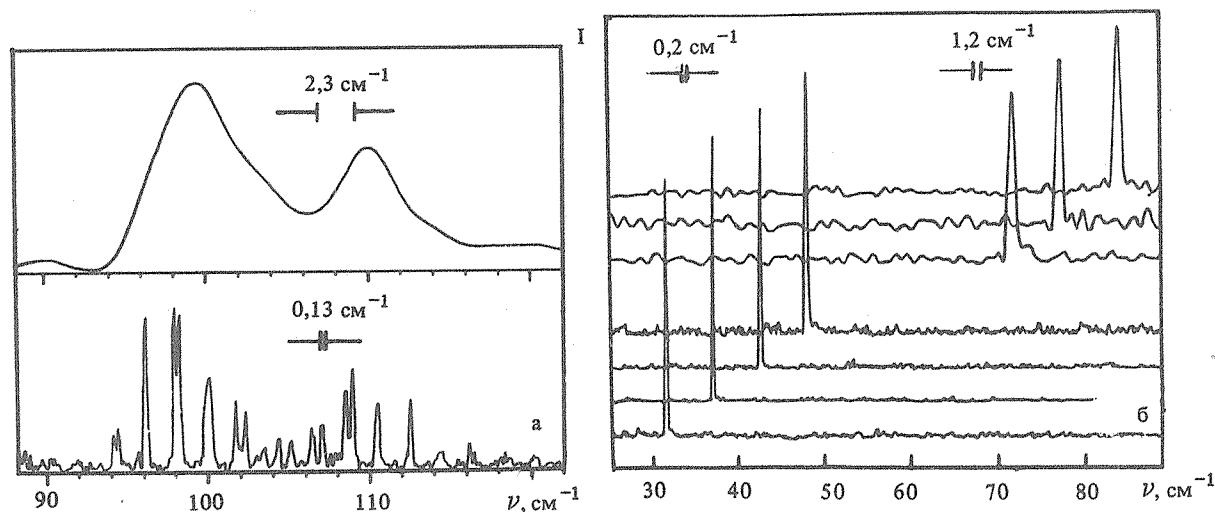


Рис. 2. Спектры стимулированного излучения дырок в слабо легированных кристаллах р-Ge с $N_A = 7 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$: а – на межподзонных дырочных переходах ($H = 13,0 \text{ кЭ}$, $E = 2,0 \text{ кВ/см}$); б – на переходах циклотронного типа (слева направо: 37,4, 40,3 и 44,1 кЭ при 3,0 ÷ 3,2 кВ/см в правой части рисунка). В левой части рисунка (б) приведены спектры циклотронного типа, измеренные в р-Ge с $N_A = 6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ (слева направо: 15,8 кЭ (1,4 кВ/см), 18,7 кЭ (1,9 кВ/см), 21,6 кЭ (1,9 кВ/см), 2,4 кЭ (2,5 кВ/см)).

Таким образом, в слабо легированных кристаллах р-Ge в различных магнитных полях наблюдаются два типа лазерной генерации: генерация первого типа (область 2), характеризующаяся широким спектром усиления, и генерация второго типа (область 2'), характеризующаяся узкой линией усиления, перестраиваемой по частоте магнитным полем. Генерация первого типа объясняется межподзонными дырочными переходами и имеет классический аналог [1,9]. Общая картина явления усложняется квантующим действием магнитного поля [2, 3, 8–10]. Расчет, выполненный в рамках квантовой теории, показывает, что спектр в этом случае должен состоять из ряда широких полос, отвечающих переходам с отдельных уровней Ландау легких дырок в тяжелую подзону, и объясняет их перестройку при изменении магнитного поля [8,10]. Переходам этого типа на рис. 3 соответствует полоса В. Генерация второго типа во многом похожа на наблюдающуюся в чистых кристаллах р-Ge [5–7] и объясняемую в [5,6] циклотронными переходами в подзоне легких дырок. Однако проведенные расчеты свидетельствуют о том, что и второй тип генерации мо-

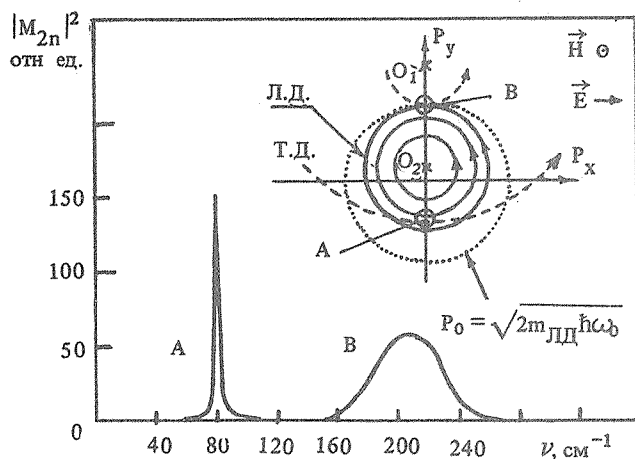


Рис. 3. Результаты теоретического расчета матричных элементов дырочных переходов с одного из уровней Ландау ($n = 2$) подзоны легких дырок в подзону тяжелых дырок в p -Ge в полях $\vec{E} \perp \vec{H}$. Полоса В обусловлена обычными межподзонными дырочными переходами с одинаковыми компонентами квазиимпульса p_x (имеется классический аналог), полоса А — межподзонными дырочными переходами в районе антипересечения уровней Ландау легких и тяжелых дырок вблизи ЦР частоты легких дырок (квантовый эффект). Расчет выполнен для $H = 40$ кЭ и $E = 3$ кВ/см. На вставке показана схема траекторий легких дырок (сплошные линии) и тяжелых дырок (пунктирные линии) в импульсном пространстве, отвечающих уровням Ландау в указанных полях. O_1 и O_2 — импульсы дрейфа тяжелых и легких дырок, $\hbar\omega_0$ — энергия оптического фотона.

жет быть объяснен межподзонными дырочными переходами. В этом случае речь идет о переходах в состоянии, которые оказываются смешанными из-за взаимодействия уровней Ландау легких и тяжелых дырок в местах их пересечения [8, 10]. Как видно из рис. 3, помимо полосы В, соответствующей обычным межподзонным дырочным переходам, в рассчитанном спектре проявляется резкая особенность в области циклотронной частоты легких дырок (полоса А), которая не связана непосредственно с циклотронным резонансом и является результатом дырочных переходов из легкой в тяжелую подзону. Правила отбора в данном случае оказываются близкими к правилам отбора для ЦР на легких дырках ($\Delta n = \pm 1$). Наблюдаемое излучение может быть связано с этой особенностью. Описанный эффект по своей природе близок к эффектам туннелирования, рассматриваемым в [5, 11], и вполне может быть привлечен для объяснения стимулированного излучения циклотронного типа не только в слабо легированных, но и в более чистых кристаллах дырочного германия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Субмиллиметровые лазеры на горячих дырках в полупроводниках. Сб. статей под ред. А.А. Андропова. Горький, ИПФ АН СССР, 1987, с. 123.
2. Мурзин В. Н. и др. Краткие сообщения по физике ФИАН, № 5, 17 (1986); Письма в ЖТФ, 12 (21), 1328 (1986).
3. Митягин Ю. А. и др. Краткие сообщения по физике ФИАН, № 12, 30 (1986); ЖТФ, 57, 1847 (1987).
4. Андронов А. А. и др. Квантовая электроника, 14 (4), 702 (1987).
5. Полупроводниковые мазеры на циклотронном резонансе. Сб. статей под ред. А.А. Андропова. Горький, ИПФ АН СССР, 1986, с. 102.
6. Васильев Ю. Б., Иванов Ю. Л. Письма в ЖТФ, 9 (10), 613 (1983); 10 (15), 949 (1984); в сб. статей "Полупроводниковые мазеры на циклотронном резонансе". Горький, ИПФ АН СССР, 1986, с. 102.
7. Митягин Ю. А. и др. Краткие сообщения по физике ФИАН, № 8, 11 (1987).
8. Стокликский С. А. Краткие сообщения по физике ФИАН, № 7, 36 (1987).
9. Муравьев А. В., Ноздрин Ю. Н., Шагин В. Н. Письма в ЖЭТФ, 43, 348 (1986).
10. Митягин Ю. А. и др. Письма в ЖЭТФ, 46 (3), 116 (1987).
11. Дьяконов М. И., Перель В. И. ЖЭТФ, 92, 350 (1987).

Поступила в редакцию 6 июля 1987 г.